

Усереднення та транспортування

УДК 622.831.325.3:621.643:532.576; 622.7

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

Л.А. НОВИКОВ

(Украина, Днепр, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ГАЗОПРОВОДАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. При исследовании закономерностей движения газовых смесей в газопроводах низкого давления необходимо учитывать физические свойства транспортируемой среды, а также влияние внешних факторов на режимы течения. Для повышения эффективности транспортировки газовых смесей по системам подземных трубопроводов, систем вентиляции в условиях обогащательных фабрик, а также устройств для очистки воздуха (пневмосепараторы, циклоны и др.) необходимо располагать информацией о закономерностях движения газов в каналах (трубах) с различной формой поперечного сечения. В частности для определения аэродинамического сопротивления технологических устройств или трубопроводов находят его удельную величину, характеризующую степень загрязненности и абсолютную эквивалентную шероховатость обтекаемой твердой поверхности.

В качестве местных гидравлических сопротивлений можно рассматривать трубопроводную арматуру, а также сепарационные устройства различной модификации. Это позволяет осуществлять выбор оптимальных параметров и режимов работы технологических устройств и систем.

Анализ исследований и публикаций. При исследовании течений газовых смесей в различных технологических процессах, помимо полуэмпирических теорий используются методы газовой динамики, а также основанные на них математические модели газовых течений [1, 2].

Влияние газозвеси приводит к изменению параметров газового потока. В работе [3] показано, что увеличение содержания пыли с фиксированным диаметром при заданной массовой концентрации приводит к снижению динамической вязкости высокодисперсной системы и потерь давления в пневмосепараторе. При этом изменение динамической вязкости, плотности и потерь давления в пневмосепараторе зависят от интенсивности межфазных взаимодействий, которые определяются значениями энергии турбулентных пульсаций скорости газообразной среды, а также размера и массовой концентрации частиц пыли.

В работах [1, 4, 5] был проведен анализ структуры однофазных и двухфазных потоков в трубах. Предложены различные математические модели, в частности, следует выделить модель двухфазного течения с переменным распределением параметров.

Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 67(108)

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование особенностей изменения удельного аэродинамического сопротивления вакуумного дегазационного трубопровода.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим движение газовой смеси в вакуумном дегазационном трубопроводе постоянного диаметра со скоплением влаги (рис. 1)

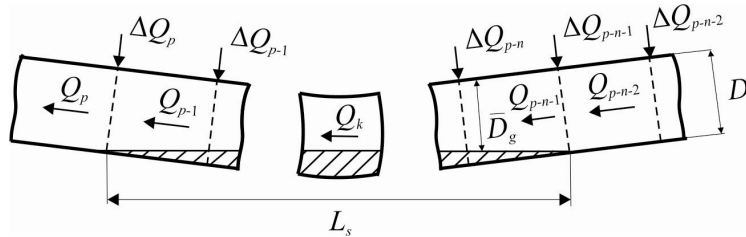


Рис. 1. Схема участка трубопровода со скоплением влаги:

$\Delta Q_{p-n-2}, \Delta Q_{p-n-1}, \dots, \Delta Q_p$ – притоки воздуха через фланцевые соединения звеньев, $\text{м}^3/\text{с}$;
 $Q_{p-n-2}, Q_{p-n-1}, \dots, Q_p$ – расходы газовой смеси в звеньях, $\text{м}^3/\text{с}$; L_s – длина скопления влаги, м;
 D_v, \bar{D}_g – гидравлические диаметры трубопровода, соответственно незагрязненного участка и средний гидравлический в месте скопления влаги, м

Считая объемный расход метана постоянной величиной, запишем соотношения для звена трубопровода за пределами скопления влаги (рис. 1):

$$Q_i = Q_{n,i} + \Delta Q_{n,i};$$

$$Q_{k,i} = Q_i + \Delta Q_{k,i};$$

$$c_i = JQ_i^{-1},$$

где $i = 1 \div N$ – номер звена; N – число звеньев трубопровода; $J = \text{const}$ – объемный расход метана, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_i, Q_{n,i}, Q_{k,i}$ – расходы газовой смеси соответственно в i -том звене, в его начальном и конечном сечении, $\text{м}^3/\text{с}$; $\Delta Q_{n,i}, \Delta Q_{k,i}$ – притоки воздуха соответственно в начальном и конечном сечении i -того звена, $\text{м}^3/\text{с}$; $c_i, c_{k,i}$ – концентрации метана соответственно в i -том звене и в его конечном сечении.

Величина расхода газовой смеси и концентрация метана в конечном сечении трубопровода будут такими же, как и в конечном сечении последнего звена:

$$Q_{k,N} = Q_N + \Delta Q_{k,N};$$

$$c_{k,N} = JQ_{k,N}^{-1},$$

где ΔQ_j – притечки воздуха, поступающие через j -тое фланцевое соединение, м³/с.

Для приближенной оценки величины суммарных притечек воздуха в негерметичном трубопроводе воспользуемся соотношением

$$\sum \Delta Q = L_t \Delta Q_y,$$

где $\Delta Q_y = 10^{-3} L_t$ м³/(с·м) – удельные притечки воздуха.

Тогда для расхода газовой смеси в конечном сечении i -того звена и трубопровода можно записать:

$$Q_{k,i} \approx Q_{n,1} + \Delta Q_y \sum_{i=1}^N l_i;$$

$$Q_{k,N} \approx Q_{n,1} + \Delta Q_y L_t,$$

где l_i – длина i -того звена, м.

Скопление влаги на участке трубопровода ограничено звеньями с номерами $p-1$ и $p-n-1$. Участок трубопровода и слагающие его звенья характеризуются средним гидравлическим диаметром \bar{D}_g и площадью проходного сечения \bar{S}_g . Параметры \bar{D}_g и \bar{S}_g соответствуют средней ширине скопления влаги \bar{B} .

Для аэродинамического сопротивления трубопровода [6] с учетом скопления влаги получим соотношение

$$R_a = \frac{1}{2S^2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\lambda_i l_i}{D_v} + \zeta_i \right) \rho_i + \sum_{j=1}^p \left[\frac{\bar{\lambda}_j l_j}{\bar{D}_j} + \bar{\xi}_{mf,j} + \zeta_j \right] \frac{\rho_j}{2\bar{S}_j^2}, \quad (1)$$

где $i = 1 \div m$ – номер звена без скопления влаги; m – число звеньев без скоплений влаги; l_i – длина i -того звена, м; λ_i – коэффициент Дарси i -того звена; ζ_i – коэффициент местного гидравлического сопротивления в i -том звене (контрольно-регулирующая аппаратура, ответвления трубопровода); ρ_i – плотность газовой смеси в i -том звене, кг/м³; $j = 1 \div p$ – номер звена со скоплениями влаги; p – число звеньев со скоплениями влаги; l_j – длина j -того звена, м; \bar{D}_j – средний гидравлический диаметр j -того звена, м; $\bar{\lambda}_j$ – средняя величина коэффициента Дарси j -того звена; $\bar{\xi}_{mf,j}$ – средняя величина коэффициент сопротивления межфазного трения по длине j – того звена; ζ_j – коэффициент местного гидравлического сопротивления в j -том звене; ρ_j – плотность газовой смеси в j -том звене, кг/м³; \bar{S}_j – средняя площадь проходного сечения j -того звена, м².

Согласно методу эквивалентных длин, в трубопроводе с постоянным гид-

Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 67(108)

равлическим диаметром и расходом газа или жидкости местное гидравлическое сопротивление можно условно заменить прямолинейным участком трубопровода с эквивалентной длиной. При этом потери на трение по длине прямолинейного участка равны потерям от местного сопротивления

$$\xi_{\text{э}} = \frac{\lambda L_{\text{э}}}{D_v} = \zeta,$$

где $L_{\text{э}}$ – эквивалентная длина трубопровода, м; $\xi_{\text{э}}$ – коэффициент сопротивления трения, определяемый для прямолинейного участка трубопровода с эквивалентной длиной $L_{\text{э}}$.

Из выражения (1) следует

$$r_y = \frac{R_a}{L_t} = \frac{1}{2S^2 L_t} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\lambda_i l_i}{D_v} + \zeta_i \right) \rho_i + \frac{1}{L_t} \sum_{j=1}^p \left[\frac{\bar{\lambda}_j l_j}{\bar{D}_j} + \bar{\xi}_{mf,j} + \zeta_j \right] \frac{\rho_j}{2\bar{S}_j^2}, \quad (2)$$

где r_y – удельное аэродинамическое сопротивление трубопровода, $\text{Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^7$.

При отсутствии местных гидравлических сопротивлений включая участки трубопровода со скоплениями влаги выражение (2) примет вид

$$r_y = \frac{R_a}{L_t} = \frac{1}{2S^2 L_t} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\lambda_i l_i}{D_v} \right) \rho_i.$$

Для расчета аэродинамического сопротивления дегазационного трубопровода примем следующие исходные данные: длина трубопровода – $L_t = 960$ м; длина звеньев – $l = 4$ м; абсолютное давление газовой смеси в начальном сечении трубопровода – $p_n = 93$ кПа; диапазон изменения средней концентрации метана в трубопроводе \bar{c} – от 40 до 80%; средняя скорость газовой смеси – $\bar{U} = 12$ м/с; уровень жидкости на заниженном участке трубопровода – $H = 0,5D_v$; расстояние до заниженного участка трубопровода со скоплением влаги $x = 484$ м.

Зависимости удельного аэродинамического сопротивления дегазационного трубопровода от абсолютной эквивалентной шероховатости его внутренней поверхности и средней концентрации метана в газовой смеси, полученные по формулам (1), (2) приведены на рис. 2.

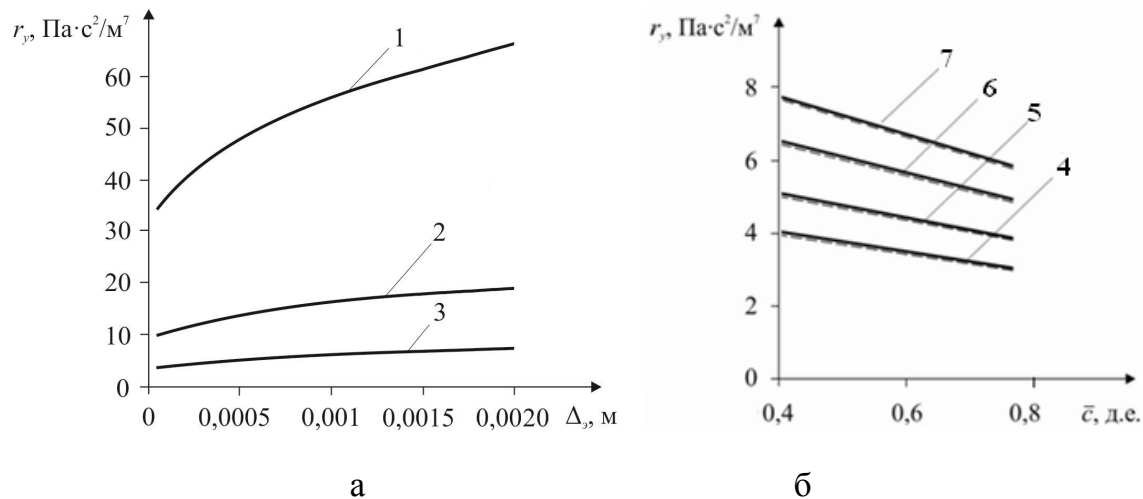


Рис. 2. Зависимости удельного аэродинамического сопротивления дегазационного трубопровода от абсолютной эквивалентной шероховатости (а) и средней концентрации метана (б):

--- – регрессионная зависимость; 1 – $D_v = 0,203$ м; 2 – $D_v = 0,257$ м;
3 – $D_v = 0,309$ м; 4 – $\Delta_s = 0,05 \cdot 10^{-3}$ м; 5 – $\Delta_s = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м; 6 – $\Delta_s = 0,001$ м;
7 – $\Delta_s = 0,001$ м и скопление влаги

Функциональная зависимость $r_y = f(\Delta_s)$ приведенная на рис. 2, а, получена при средней концентрации метана $\bar{c} = 50\%$.

Из рис. 2, а следует, что аэродинамическое сопротивление трубопровода прямо пропорционально эквивалентной шероховатости его внутренней поверхности и обратно пропорционально гидравлическому диаметру трубопровода.

Из рис. 2, б видно, что аэродинамическое сопротивление трубопровода обратно пропорционально средней концентрации метана в газовой смеси и прямо пропорционально эквивалентной шероховатости его внутренней поверхности. В частности прямо пропорциональная зависимость $r_y = f(\bar{c})$ объясняется снижением плотности газовой смеси при увеличении концентрации метана. Кроме того из рис. 2, б следует, что наибольшая величина аэродинамического сопротивления трубопровода наблюдается в случае образования скоплений влаги. В связи с этим трубопровод скоплением влаги можно заменить эквивалентным с абсолютной эквивалентной шероховатостью его внутренней поверхности $\Delta_s \approx 0,0019$ м.

Регрессионные зависимости на рис. 2, б характеризуются коэффициентом детерминации $R^2 = 0,99$ и описываются уравнением прямой

$$r_y = a_1 \bar{c} + a_2, \quad (3)$$

где a_1, a_2 – числовые коэффициенты (табл. 1).

Значения коэффициентов регрессионной зависимости (3)

Гидравлический диаметр трубопровода D_v , м	Абсолютная эквивалентная шероховатость Δ_s , м	a_1	a_2
0,203	0,00005	-41,327	+84,756
	0,0003	-35,991	73,742
	0,001	-27,92	57,463
	0,001 (включая скопления влаги)	-21,78	45,329
0,257	0,00005	-12,273	24,975
	0,0003	-10,519	21,394
	0,001	-8,1616	16,674
	0,001 (включая скопления влаги)	-6,3712	13,162

Выводы и направление дальнейших исследований

Аэродинамическое сопротивление трубопровода прямо пропорционально эквивалентной шероховатости его внутренней поверхности и обратно пропорционально гидравлическому диаметру трубопровода. В частности аэродинамическое сопротивление трубопровода обратно пропорционально средней концентрации метана. При этом прямо пропорциональная зависимость $r_y = f(\bar{c})$ объясняется снижением плотности газовой смеси при увеличении концентрации метана.

Наибольшая величина аэродинамического сопротивления трубопровода наблюдается в случае образования скоплений влаги.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на исследование особенностей однофазных и двухфазных взаимодействий.

Список литературы

1. Новиков Л.А. Математическая модель движения турбулентного потока газовзвеси в дегазационном трубопроводе // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – 2008. – Вып. 76. – С. 126-131.
2. Кривошеков В.И. Концепция исследований двухфазных сред в сепарационных аппаратах // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 56(97). – С. 127-128.
3. Кривошеков В.И., Новиков Л.А. Влияние дисперсности среды на потери давления в пневмосепараторе / В.И. Кривошеков// Збагачення корисних копалин: Наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 52(93). – С. 63-70.
4. Чисхолм Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках. – М.: Недра, 1986. – 204 с.
5. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. – 436 с.
6. Шкундин С.З., Иванников А.Л. Единый подход к расчету вентиляционных и дегазационных сетей угольных шахт // Горный информ.-аналит. бюл. – 2011. – № 6. – С. 428-436.

© Кривошеков В.И., Новиков Л.А., 2017

*Надійшла до редколегії 12.09.2017 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горбець*